

**О. В. Якивчук\*, И. Н. Белоконова**

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

\**yakivychuk.olga@yandex.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук С. Б. Сидельников

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Mg, ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННЫХ СКАНДИЕМ

В работе представлены результаты исследования структуры и свойств листов, полученных горячей и холодной прокаткой из алюминиевых термически неупрочняемых сплавов на основе системы Al–Mg. Показана возможность получения листового проката из экономно легированных переходными металлами сплавов системы Al–Mg с комплексом механических свойств, превосходящих уровень свойств полуфабрикатов из сплава 5083.

*Ключевые слова:* алюминиевые сплавы, переходные металлы, прокатка, механические свойства, скандий, цирконий, отжиг.

***O. V. Yakivychuk, I. N. Belokonova***

## RESEARCH OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF FLAT SHEET ROLLED PRODUCTS FROM ALLOYS OF THE Al–Mg SYSTEM WHICH ECONOMICALLY DOPED BY SCANDIUM

The paper presents the results of studying the structures and properties of sheets obtained by hot and cold rolling from aluminum thermally non-hardening alloys based on the Al–Mg system. The possibility of producing of flat sheets rolled products from alloys of the Al–Mg system which economically doped by transition metals with a complex of mechanical properties that are superior to the level of properties of semi-finished products from alloy 5083 is shown.

*Keywords:* aluminum alloys, transition metals, rolling, mechanical properties, scandium, zirconium, annealing.

Ранее, совместно с сотрудниками ООО «РУСАЛ ИТЦ», были проведены научно-исследовательские работы по созданию экспериментальных алюминиевых сплавов на базе сплава 5083 с различным содержанием легирующих элементов, которые обладали бы более высокими эксплуатационными свойствами. В качестве легирующих элементов использовали: Mg, Cr, Zr, Mn, Fe и Sc, которые оказывают существенное влияние на механические свойства и коррозионную стойкость изделий из них. По результатам многочисленных исследований из литературы известно, что малые добавки скандия значительно

повышают уровень прочности магналиев без снижения технологичности при обработке металлов давлением [1–4]. Однако для достижения такого эффекта содержание скандия в сплаве должно соответствовать 0,2–0,45 %.

Основной задачей исследований было создание сплава с минимально возможным содержанием скандия за счет его замещения комплексным легированием указанных выше элементов для получения требуемого сочетания достаточно высоких прочностных и пластических свойств. Далее разрабатывали технологию обработки таких сплавов с возможностью получения из них полуфабрикатов для нужд авиакосмической, судостроительной и автомобильной промышленности. Исследовали условия литья, режимы горячей и холодной прокатки, а также режимы термической обработки на различных этапах технологического процесса [5, 6].

В качестве объектов исследования в данной работе использовали литые и деформированные полуфабрикаты из сплава 5083 и опытного сплава на его основе с содержанием скандия 0,10–0,14%. От промышленных плоских слитков отрезали темплеты для прокатки размерами 40 × 120 × 200 мм. Литые заготовки подвергали двухступенчатому гомогенизационному отжигу по режиму: 1-я ступень – 350 °С, выдержка 11 часов; 2-я ступень – 425 °С, выдержка 8 часов; охлаждение на воздухе. Поверхности фрезеровали на глубину 1 мм с каждой стороны.

Горячую прокатку гомогенизированных заготовок до толщины 10 и 5 мм проводили на стане ДУО 330 при температуре заготовки 450 °С, с техническими характеристиками, приведенными в таблице.

Таблица

Технические характеристики листопрокатного стана ДУО 330

Наименование параметра	Величина
Мощность электродвигателя, кВт	90
Напряжение питания сети трехфазное, В	380
Частота тока, Гц	50
Ширина бочки валков, мм	520
Диаметр валков, мм	330
Максимальный развод валков, мм	70
Частота вращения валков, об/мин	10
Максимальное усилие прокатки, МН	1,55
Максимальный момент прокатки, МН·м	0,82

Далее холодной прокаткой получали полосы толщиной 3 мм и подвергали отжигу при температуре 350 °С и времени выдержки 3 часа. Степень суммарной деформации при горячей прокатке до толщины 10 мм составила 75 % и была равной 80 % при прокатке до толщины 5 мм. Степень суммарной деформации при прокатке до толщины 3 мм составила порядка 95 %.

Металлографический анализ полуфабрикатов показал, что микроструктура гомогенизированных слитков представлена кристаллами  $\alpha$ -твердого раствора и включениями интерметаллидных фаз, расположенных по границам зерен. Данные фазы имеют характерный вид скелетов, прожилок и частиц неправильной формы. Также в структуре присутствуют включения первичных интерметаллидов пластинчатой и разветвленной формы, расположенных, в основном, в центре зерен.

Деформация приводит к искажению кристаллической структуры, происходит рост плотности дислокаций и вакансий. При горячей деформации изменяется тонкая структура, формируются субзерна, что обеспечивает разупрочнение во время обработки. При холодной прокатке полуфабрикатов увеличение степени деформации приводит к их упрочнению и снижению пластичности. Деформированные полуфабрикаты наследуют структуру литого металла. В процессе деформации зерна вытягиваются, включения и раздробленные кристаллы первичных интерметаллидов располагаются в виде строчек вдоль направления деформации (рис. 1, а, б).

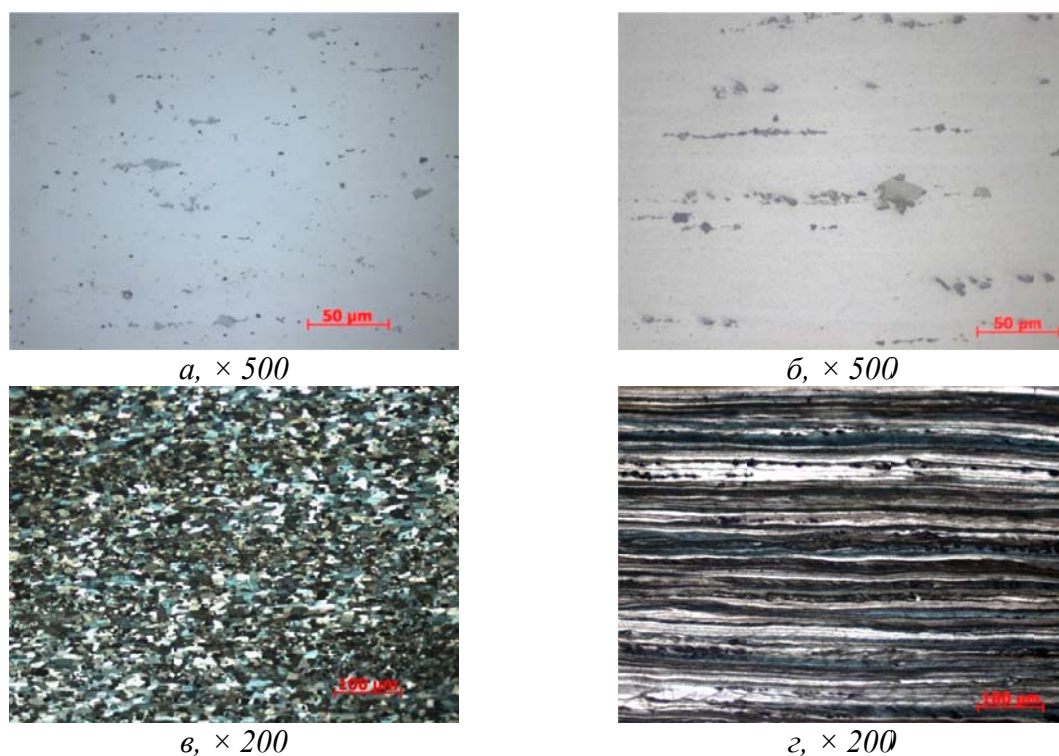


Рис. 1. Микроструктура полуфабрикатов толщиной 3 мм после отжига:  
а, в – сплав 5083; б, г – опытный сплав

Отжиг может приводить к рекристаллизации и дополнительным процессам распада пересыщенного твердого раствора по Mn, Cr, Zr, Sc. Оценку протекания рекристаллизационных процессов после отжига листов толщиной 3 мм проводили на оксидированных образцах. Известно, что при технологических нагревах Al–Mg сплавов, легированных скандием и

цирконием, происходит распад пересыщенного твердого раствора с образованием дисперсных упрочняющих выделений фазы  $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ , когерентных решетке алюминия. Данные фазы оказывают значительное упрочняющее действие и повышают температуру рекристаллизации деформированных полуфабрикатов. В соответствии с рисунком 1, в структуре листов из опытного сплава со скандием не обнаружено признаков рекристаллизации (рис. 1, з), в то время как в листах из сплава 5083 рекристаллизация прошла полностью по всему объему (рис. 1, в).

Исследование механических свойств литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов проводили методом растяжения в соответствии с ГОСТ 1497–84, результаты приведены на рис. 2.

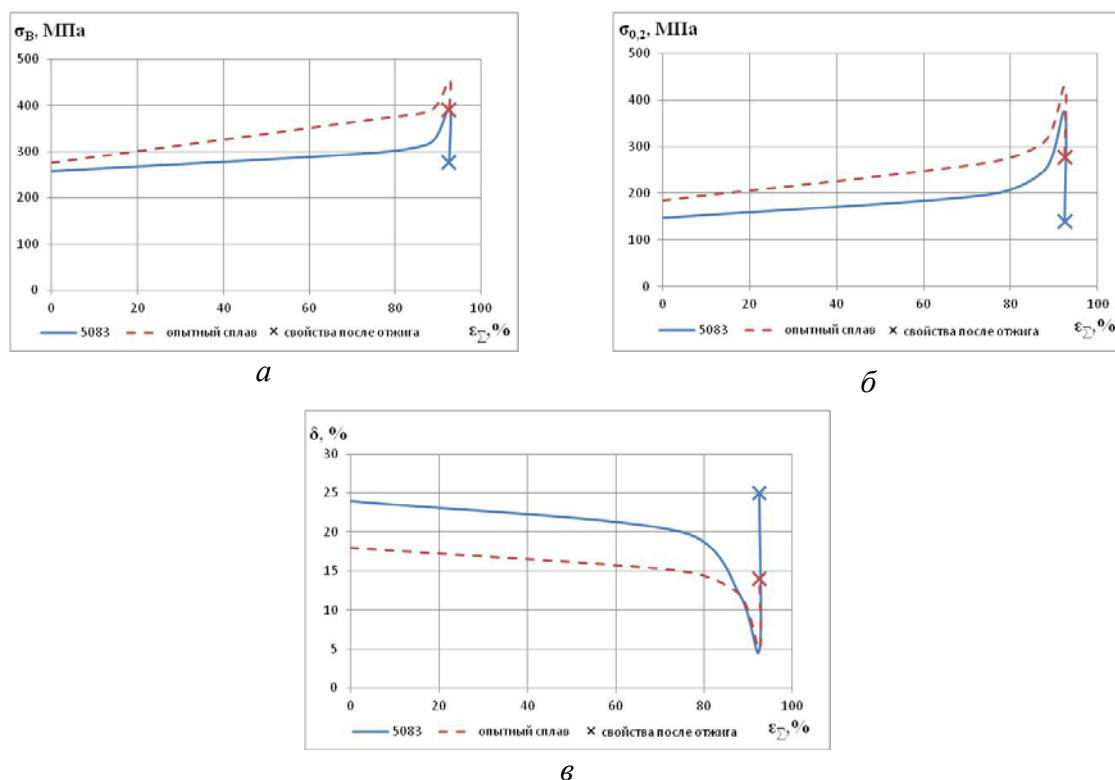


Рис. 2. Влияние суммарной степени деформации и отжига на механические свойства полуфабрикатов: а – временное сопротивление разрыву; б – предел текучести металла; в – относительное удлинение

Прочностные свойства литой заготовки из сплава со скандием превосходят значения свойств заготовки из сплава 5083. С увеличением степени деформации временное сопротивление разрыву и предел текучести металла увеличиваются, а пластичность снижается, что соответствует общим закономерностям пластической деформации. Значения временного сопротивления разрыву и предела текучести металла опытного сплава в 1,3 раза выше, чем для полуфабрикатов их сплава-аналога 5083 (рис. 2, а, б). Анализ изменения величины относительного удлинения показал, что с увеличением степени деформации при прокатке

опытного сплава его величина падает с 18 до 5 %, однако термическая обработка позволяет восстановить пластические свойства до 14 % (рис. 2, в).

В результате проведенных исследований предложены новые сплавы на основе сплава 5083 с содержанием скандия 0,10–0,14%. Разработаны режимы технологической обработки и получения листовых полуфабрикатов из опытных сплавов с более высоким комплексом механических свойств. Изучены закономерности изменения механических свойств и структуры деформированных полуфабрикатов в зависимости от изменения степени деформации и термической обработки. Полученные данные будут использоваться при освоении технологий литья и обработки этих сплавов в промышленных условиях.

*В работе использованы результаты исследований, выполненных в ходе проекта 03.G25.31.0265 «Разработка экономнолегированных высокопрочных Al-Sc сплавов для применения в автомобильном транспорте и судоходстве» в рамках Программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние скандия на физико-химические свойства сплава АМг4/ С. Ж. Иброхимов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4. С. 256–260.
2. Филатов Ю. А. Исследование и разработка новых высокопрочных свариваемых сплавов на основе системы Al–Mg–Sc и технологических параметров производства из них деформированных полуфабрикатов Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук / Ю. А. Филатов. Москва : ОАО «ВИЛС», 2000. 50 с.
3. Malopheyev S. Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al–Mg–Sc–Zr alloy / S. Malopheyev, V. Kulitskiy, R. Kaibyshev // Journal of Alloys and Compounds. 2017. V. 698. P. 957–966.
4. Effects of homogenization treatments on the microstructure evolution, microhardness and electrical conductivity of dilute Al-Sc-Zr-Er alloys / W. Kang [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. 2017. V. 704. P. 683–692.
5. Research of rolling regimes and mechanical properties of cold-rolled, annealed and welded semi-finished products from experimental alloys of Al–Mg system, economically alloyed by scandium / V. N. Baranov [et al.] // Tsvetnye Metally. 2017. № 9. P. 83–88.
6. Handling ability of processing and properties of rolling products of Al–Mg system prudently doped with scandium / Yakiviyuk O. V. [et al.] // Non-ferrous metals and minerals 2016: collection of theses of reports. Krasnoyarsk, 2016. P. 262–263.